

## **38 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении**

и оптимизируя аэрационные системы путем замены пористых аэраторов старых типов на современные дисковые, можно достичь существенной экономии электроэнергии на очистку сточных вод без значительных капитальных затрат на реконструкцию действующих очистных сооружений. При этом пористые аэраторы из порошка титана, несмотря на их высокую стоимость, имеют ресурс, на порядок превышающий ресурс полимерных аэраторов, что также обеспечивает экономию за счет сокращения объемов строительно-монтажных работ, простоев при ремонте и обслуживании аэротенков.

### **Л и т е р а т у р а**

1. Кудина, Е. Ф. Химия и микробиология воды : учеб. пособие / Е. Ф. Кудина, О. А. Ермолович, Ю. М. Плескачевский ; под ред. Ю. М. Плескачевского, А. С. Неверова. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 335 с.
2. Жерноклев, А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилинович, В. В. Савич ; под ред. Н. В. Холодинской. – Минск : Тонпик, 2002. – 129 с.
3. Радкевич, И. Л. Аэраторы и системы аэрации / И. Л. Радкевич // Вода. – 1997. – № 7. – С. 4–7.
4. Непаридзе, Р. Ш. Мелкопузырчатая система аэрации сточных вод в аэротенках / Р. Ш. Непаридзе // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 2. – С. 12–16.
5. Пористые аэраторы из порошков металлов. Опыт применения в системах очистки питьевой и сточной воды / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Экологическая и техногенная безопасность. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов : сб. науч. тр. XIX Междунар. науч.-техн. конф. ; под ред. В. Ф. Костенко, Д. Н. Почепецкого / УкрВОДГЕО. – Харьков, 2012. – С. 163–176.

УДК 629.464.2:004.94

### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНЦЕВОГО ПОЛУВАГОНА СНЕГОУБОРОЧНОГО ПОЕЗДА СМ-2**

**К. В. Максимчик, Н. В. Комаровский**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», г. Гомель*

*Проведен анализ прочности конструкции рамы концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2. С использованием программного комплекса ANSYS Workbench выполнено конечно-элементное моделирование его напряженно-деформированного состояния при нормативных режимах нагружения. Получены схемы распределения напряжений, которые показали, что максимальные значения эквивалентных по Мизесу напряжений наблюдаются в местах соединения хребтовой балки со шкворневой, а также в боковой балке в зоне установки выбросного конвейера. Результаты являются основой для разработки рекомендаций по усилению конструкции рамы концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2.*

**Ключевые слова:** снегоуборочный поезд, конечной полувагон, метод конечных элементов, нормативные режимы нагружения, напряженно-деформированное состояние.

### **ANALYSIS OF THE RESULTS OF STRESS-STRAIN STATE MODELING OF THE END HALF-WAGON OF THE SM-2 SNOW REMOVAL TRAIN**

**K. V. Maksimchyk, N. V. Komarovsky**

*Belarusian State University of Transport, Gomel*

*The strength of the end half-wagon frame structure of the SM-2 snow removal train was analyzed. Using the ANSYS Workbench software package, finite element modeling of its stress-*

*strain state under standard loading conditions was carried out. Stress distribution patterns were obtained, which showed that the maximum equivalent von Mises stresses are observed at the junctions of the spine beam with the pivot beam, as well as in the side beam in the ejector conveyor installation. The results serve as the basis for developing recommendations to reinforce the frame structure of the end half-wagon of the SM-2 snow removal train.*

**Keywords:** snow removal train, end half-wagon, finite element method, standard loading conditions, stress-strain state.

В современных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта особое внимание уделяют его надежности и долговечности. Снегоуборочный поезд, который используют в пространстве железнодорожной колеи 1520 мм, не является исключением. В частности, поезд СМ-2 играет важную роль в обеспечении бесперебойной работы железнодорожных путей в зимний период.

Исследования [1, 2] показывают, что большинство машин данной модели вырабатывают свой нормативный ресурс, и единовременное обновление всего парка техники невозможно. Поэтому возникает необходимость в выполнении исследований для определения возможности продления срока полезного использования единиц техники.

Анализ публикаций [3–5] указывает на то, что результаты компьютерного моделирования с достаточной точностью описывают напряженно-деформированное состояние различных конструкций и могут служить теоретической основой для моделирования единиц подвижного состава снегоуборочного поезда СМ-2.

Метод конечных элементов (далее – МКЭ) является одним из наиболее эффективных и широко используемых методов анализа напряженно-деформированного состояния различных конструкций [6, 7]. Этот метод позволяет рассматривать любое сочетание и вид эксплуатационных нагрузок и тем самым оценить несущую способность рассматриваемой конструкции. При помощи МКЭ выявляют наиболее опасные зоны конструкции и предлагают варианты их усиления, что способствует повышению надежности и долговечности железнодорожного подвижного состава [8, 9].

**Геометрическая и конечно-элементная модели.** Геометрическая модель полувагона разработана на основе конструкторской документации в среде программы CreoParametric. В работе рассматривается сварная конструкция, состоящая из продольных и поперечных балок, связанных вертикальными стойками и раскосами, образующими каркас полувагона, которые несут основную нагрузку от рабочего оборудования и собственной массы. Еще в модель включены элементы крепления накопителя, питателя и выбросного конвейеров, а также узлов шкворневых балок и упоров автосцепного устройства.

Конечно-элементная модель концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2 выполнена в среде программного пакета ANSYS Workbench. Модель включает 353 твердотельные детали, ограниченные в трех плоскостях, что создает между ними 731 контакт. Материал деталей – сталь со следующими характеристиками: модуль упругости  $E = 210$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; плотность  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Параметры сетки конечных элементов: характерный размер конечного элемента – 50 мм; количество узлов – 1697091; число конечных элементов – 539719.

**Результаты моделирования.** В процессе работы получены схемы распределения эквивалентных напряжений и деформаций в металлоконструкции полувагона в соответствии с нормативными расчетными режимами по ГОСТ 33211. Особое внимание уделено областям с максимальными значениями эквивалентных напряжений (см. таблицу). Они являются наиболее уязвимыми и требуют детального анализа для предотвращения возможных повреждений и отказов конструкции.

#### 40 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения наблюдались в области соединения шкворневой балки с хребтовой и составили 493,72 МПа, при допускаемых значениях для заданного материала – 250 МПа (режим, соответствующий торможению поезда, движущегося в кривом участке пути). В некоторых точках конструкции проявились всплески напряжений, связанные с несовершенством геометрии модели. В остальных областях конструкции напряжения не превысили допускаемых значений и составили не более 160 МПа. Максимальные напряжения наблюдаются в хвостовой части концевого полувагона, что обусловлено наличием в этой области выбросного конвейера, который делает конструкцию рамы менее жесткой по сравнению с головной частью.

#### Максимальные по Мизесу эквивалентные напряжения по расчетным режимам

Наименование элемента	Максимальные по Мизесу эквивалентные напряжения по режимам, МПа							
	Ia (удар в хвостовую часть)	Ia (удар в головную часть)	Iб (трогание со стороны хвостовой части)	Iб (трогание со стороны головной части)	Iв (закрепление в хвостовой части)	Iв (закрепление в головной части)	Iг (закрепление в хвостовой части)	Iг (закрепление в головной части)
Хребтовая балка в зоне контакта с шкворневой	326,24	380,06	378,97	330,78	471,69	493,72	284,58	313,8
Боковая балка в зоне установки выбросного конвейера	206,65	380,14	212,22	198,26	332,58	372,95	163,36	227,69

В ходе выполнения работы проведен анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2 под действием предельных эксплуатационных нагрузок. Эквивалентные по Мизесу напряжения в зоне соединения хребтовой балки со шкворневой превышают допускаемые значения. Также значительные напряжения наблюдаются в боковой балке в районе установки выбросного конвейера. Результаты указывают на необходимость установки дополнительных усиливающих элементов для обеспечения требуемой прочности конструкции. Выполненное моделирование также позволяет определить оптимальное положение точек размещения тензометрических датчиков при проведении натурных испытаний.

#### Литература

1. Балтабаев, А. С. Оценка прочности вагонов-снегоочистителей при коррозионном утонении их базовых узлов / А. С. Балтабаев, М. В. Зимакова, А. С. Сараев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 3 (28). – С. 34–39.
2. Максимчик, К. В. Конечно-элементное моделирование деформирования рамной конструкции вагона снегоуборочного поезда СМ-2 / К. В. Максимчик, А. О. Шимановский // Механика. Исследования и инновации. – 2023. – № 16. – С. 142–147.

3. Liang, Y. A new method for multivariable nonlinear coupling relations analysis in complex electromechanical system / Y. Liang, Z. Gao, J. Gao // *Applied Soft Computing*. – 2020. – Vol. 94. – Art. 106457. – DOI 10.1016/j.asoc.2020.106457
4. Ratner, S. Developing a strategy of environmental management for electric generating companies using DEA-methodology / S. Ratner, P. Ratner // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2017. – Vol. 17 (4). – P. 78–92. – DOI 10.25728/assa.2017.17.4.521
5. Kassner, M. Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods / M. Kassner // *International Journal of Fatigue*. – 2012. – Vol. 34, is. 1. – P. 103–111.
6. Finite element analysis (FEA) of stress distribution in platform-switched short dental implants / K. N. Gosai, V. D. Tripathi, S. Yadav [et al.] // *Bioinformation*. – 2024. – Mar. 31. – Vol. 20 (3). – P. 248–251. – DOI 10.6026/973206300200248
7. Barbero, E. J. Finite element analysis of composite materials using Abaqus / E. J. Barbero. – Boca Raton : CRC press, 2023. – 456 p.
8. Kanavalau, Y. Evaluation techniques for residual in-use utility of the railway car hopper-batcher bearing structure with a long-term service / Y. Kanavalau, A. Putsiata // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 134. – P. 57–63. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.01.039
9. Афанаськов, П. М. Несущая способность кузова вагона-самосвала для перевозки сыпучих грузов после длительной эксплуатации / П. М. Афанаськов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2020. – № 4 (68). – С. 202–210.

UDC 539.3

## **SIMULATION OF PLATE BENDING VIBRATION PROBLEMS BY THE MESHLESS BACKWARD SUBSTITUTION METHOD**

**J. Lin, Y. T. Xu**

*Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Ministry of Education),  
Hohai University, Nanjing, China*

*College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University,  
Nanjing, China*

**J. Lun**

*Materials and Structural Engineering Department,  
Nanjing Hydraulic Research Institute, China*

**S. Y. Reutskiy**

*A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv*

*In this work the meshless backward substitution method is proposed for the first time to solve the fourth-order plate bending vibration problems. The numerical solution consists of approximation from the boundary conditions and the revised basis functions which satisfying the homogeneous conditions with weighted parameters which are obtained from the governing equations by the collocation method. Then the key issues are the organization of initial approximation and the revised basis function derived from the traditional basis functions. To demonstrate the accuracy and validity of the proposed method, several numerical examples are conducted and compared with popular methods in literature. The obtained results from numerical experiments confirm the potential of the proposed method in terms of both accuracy and efficiency.*

**Keywords:** meshless method, plate bending vibration, radial basis function, backward substitution method.